

재이용수를 고려한 수도시스템의 효율성 분석 연구*

김 영 준** · 김 창 희**

《目 次》

- | | |
|------------|----------|
| I. 서론 | IV. 분석결과 |
| II. 문헌연구 | V. 결 론 |
| III. 연구방법론 | |

I. 서론

물은 모든 생명의 원천이며 사회경제의 지속 가능한 발전에 필수불가결한 자원으로, 물을 안정적으로 이용 가능한 곳에서는 제품과 서비스가 생산될 뿐만 아니라 다양한 경제적 기회가 창출된다. 이러한 물을 효율적으로 관리할 시 국가의 사회, 경제, 환경 시스템 전반에 대한 복원력이 제고되며 최종적으로 국가의 지속 가능한 발전을 유도할 수 있다.

하지만 전 세계적인 기후변화가 심화됨에 따라 홍수 및 가뭄 등의 극한 기상현상의 증가, 해수면 상승, 해양 환경의 변화, 생태계 변화 등은 수질의 악화를 가속하고 있으며 세계 각지에 식수 부족 문제를 야기하여 인간의 삶의 질과 지속가능한 발전에 심각한 도전과제가 되고 있다. 특히 환경부와 수자원공사의 통계자료에 따르면 2016년 기준 세계 평균 807mm보다 약 1.6배로 많은 강수량에도 계절별 강수량의 편차로 물 부족 국가로 분류되는 우리나라는 4계절의 온대성 기후에서 2계절의 아열대 기후로 변화되고 있으며, 연간 강우량의 편차는 더욱 심화되고 있어 물 부족 및 관리가 긴박한 문제로 부상하고 있다. 그럼에도 아직까지 우리나라의 일인당 물 사용량은 2016년 기준 333 ℓ pcd로 타 국가들에 비해 상당히 많은 양의 물을 사용하고 있으며, 주요 해외국가 전체 평균의 45% 정도의 낮은 수도 요금으로 물 낭비 예방과 절약에 대한 인식이 다소 부족하다. 이러한 배경에서 우리나라는 명백히 물 부족 국가라 할 수 있으며, 효율적인 물관리와 재이용수 이

* 본 연구는 서울대학교 경영정보연구소의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

해당 내용은 K-water 전문가포럼 단기공동연구과제로 수행한 내용을 바탕으로 수정 및 재정리하였습니다.

** 인천대학교 경영대학

용을 통한 물 낭비 예방 및 절약이 매우 필요하다고 할 수 있다.

물 낭비 예방 및 절약을 시행하기 위해서는 현재 상황을 정확하게 파악하는 것이 무엇보다 중요하기 때문에 본 연구에서는 물 관리의 기초이자 국가 안정의 기반이 되는 수도시스템들에 대한 성과를 평가한다. 이에 따라 본 연구에서는 자료포락분석을 활용하여 국내 17개 지역의 수도시스템의 효율성을 측정함으로써 각 지역의 수도시스템이 얼마만큼 효율적으로 운영되고 있으며, 수자원이 얼마만큼 효율적으로 이용되고 있는지 확인한다.

본 연구는 다음과 같은 순서로 구성된다. 먼저 2장에서는 자료포락분석을 활용하여 수도시스템의 성과를 평가한 연구들을 살펴보고, 3장에서는 본 연구에서 사용된 자료포락분석 기법과 데이터 수집, 투입 및 산출변수 선정과 연구모형에 대해 설명한다. 다음으로 4장에서는 해당 모형에 따른 효율성 분석결과를 제시하며, 마지막으로 5장에서는 해당 결과에 따른 시사점과 한계점 및 향후 연구 방향에 대해 설명한다.

II. 문헌연구

수도시스템의 실태파악에 있어, 성과평가 도구로서 자료포락분석을 활용하여 상수도시스템, 하수도시스템, 중수도시스템의 효율성을 분석한 국내외의 연구들을 각각 <표 1>, <표 2>, <표 3>과 같이 정리하였다.

특히 해당 연구들 중 Dong et al. (2018)에서는 SBM 자료포락분석 모형을 이용하여 중국 157개 도시의 물 분배, 물 공급, 하수처리 효율성을 측정하였고, Zhou et al. (2018)에서는 2단계 자료포락분석 모형을 이용하여 중국 30개 지역 수도시스템의 물이용 효율성과 하수처리 효율성을 측정하였다. 그리고 Hu et al. (2018)에서는 2단계 자료포락분석 모형을 활용하여 중국 민장강 유역 10개 도시의 물이용 효율성과 하수처리 효율성, 중수도 처리 효율성을 측정하였으며, 보기 드문 재이용수 관련 효율성 연구로 Liao and Liu (2017)은 23개 빗물 재활용 및 재사용 방법에 따른 재이용수 처리 효율성을 측정하였다.

즉, 해당 논문들은 각 수도시스템의 주요 기능 대부분에 대해 효율성을 분석하였으며, 이를 위해 어떠한 투입 및 산출 변수들을 사용했는지 확인할 수 있다. 또한 Liao and Liu (2017)을 제외한 세 개의 연구에 따라 수도시스템의 다양한 효율성을 분석하기 위해 일련의 프로세스로 이루어지는 상수도, 하수도, 중수도 등의 수도시스템을 각 시스템으로 구분하여 분석할 수 있음을 확인할 수 있다. 그리고 단일의 자료포락분석 모형보다는 2단계 자료포락분석 모형이 실제 수도시스템의 프로세스를 보다 유연하게 반영할 수 있음을 확인할 수 있다.

〈표 1〉 상수도시스템 효율성 연구

연구자	의사결정단위	투입변수	산출변수	연구기법
Yao et al. (2018)	30 regions of China	Labour, Capital, Energy, Water	Industrial product, Wastewater, Waste gas, Solid waste	DEA SBM
Deng et al. (2016)	31 regions of China	Labour, Capital	GDP, Sewage	DEA SBM
Yang and Li (2017)	30 regions of China	Labor, Capital, Total Energy Consumption, Total Water Consumption	GRDP, Water pollution	DEA SBM
Lombardi et al. (2019)	68 Italian water utility companies	Residents, Materials Cost, Cost of services, Cost of leases, Labour cost, Capital cost	Water Distributed, Water Pumped, Network length	DEA
Zhou et al. (2018)	Water use subsystem in 30 regions of China	Economic water use: Water consumption of economic development, Capital Social water use: Water consumption of social development, General public expenditure	Economic water use: GDP, Proportion of scndary industry, wastewater discharge Social water use: Income of urban households, Urban population proportion, wastewater discharge	two-stage SBM DEA
Dong et al. (2018)	157 Cities in China Urban Water Association	Fixed assets investment, Total length of network (Water distribution and sewer), Electricity consumption(Water supply and wastewater treatment), Sludge production	Clean water supplied, Wastewater treated, COD removed, SS removed, TN removed	DEA
현승현과 김정렬 (2018)	국내 127개 지방상수도	행정직원수, 전문기술직원수, 유지관리비, 요금현실화율	총급수량, 급수수익 수납액, 유수율	DEA
김나운 외 (2015)	충청북도 10개 지방자치단체	직원수, 유지관리비	수도요금수입액, 연간총생산량, 유수율	DEA
고광홍 외 (2008)	시·군 160개 수도사업장	인건비, 시설공사비, 유지관리비, 원리금상환액	수도요금수입액, 수도물생산량	DEA

〈표 2〉 하수도시스템 효율성 연구

연구자	의사결정단위	투입변수	산출변수	연구기법
Zhou et al. (2018)	Wastewater treatment subsystem in 30 regions of China	Economic wastewater discharge, Social wastewater discharge, Total investment in Wastewater Treatment	Wastewater disposal, Final wastewater discharge	two-stage SBM DEA
Walker et al. (2019)	13 water and sewerage companies in the UK and Ireland	Operational expenditure, Capital expenditure, Operational GHG emissions, Length of mains and sewage pipes	Water delivered & wastewater treated	double-bootstrap DEA
Feng et al. (2019)	518 wastewater treatment plants in 10 regions of China	Equipment investment, Electricity usage, Employee	Wastewater treatment, Sewage sludge water content	SBM DEA
Jiang et al. (2020)	861 wastewater treatment plants in China	Operating costs, Electricity consumption, Number of labors	Chemical oxygen demand(COD) removal, ammonia nitrogen removal rate, reclaimed water yield, dry sludge yield.	SBM DEA
An et al. (2018)	31 mainland provinces in China	Number of Wastewater Treatment Plants, Treatment Capacity of Wastewater Treatment Plant, Annual Operating Expenses	Actual Treatment Capacity of Urban Wastewater, Removal of Chemical Oxygen Demand, Removal of Ammonia	Super-Efficiency DEA
현승현 (2019)	국내 116개 공공하수처리시설	시설용량, 행정직원수, 기술직원수, 기타직원수, 사업비	하수처리량, BOD감소량, COD감소량, TN감소량, TP감소량	DEA-SBM
윤성일 (2016)	국내 75개 지방하수도 공기업	직원수, 순가동설비자산	연간 하수처리량, 영업수익	Game Cross-efficiency DEA
신유호와 최정우 (2015)	국내 72개 기초자치단체 하수도공기업	인건비, 물건비	평균하수처리량, 요금현실화율, 영업수지비용	DEA

〈표 3〉 중수도시스템 효율성 연구

연구자	의사결정단위	투입변수	산출변수	연구기법
Wu et al. (2015)	30 provincial level regions in mainland China	Investment in treatment of industrial waste water, waste gas and solid waste, Industrial waste water discharge, Industrial waste gas emission, Industrial solid waste generated	Output value of products made from waste water, waste gas & solid waste	2 stages network DEA
Wu et al. (2017)	30 provincial level regions in mainland China	Waste water, Full-time staff for environment protection, Investment of treating waste water and sewage	Waste water discharged (undesirable outputs), Reusable water/consumption (good outputs)	2 stages DEA
Yang et al. (2014)	29 provinces in China	Fresh water utilization: Fresh water	Fresh water utilization: Economic profit, waste water Waste water emission: Processing water, Emitted waste water Waste water regeneration: Regenerative water	Network DEA based model
Liao and Liu (2017)	23 Method to recycling and reuse rainwater	Early phrase establishment cost, Estimated maintenance management cost	Reutilization, Water storage, Area of rain water collection	DEA
Hu et al. (2018)	10 Cities in the Minjiang River Basin, China	Water use system: Capital invested, Water supply, Reused water Wastewater treatment system: Capital invested, Wastewater treatment, wastewater	Water use system: Wastewater, GDP Wastewater treatment system: Chemical organic demand, Ammonia nitrogen, Reused water	2 stages DEA

Ⅲ. 연구방법론

3.1 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, DEA)

자료포락분석은 선형계획법(Linear Programming)에 근거하여 효율성을 측정하는 비모수적 기법으로 생산함수 및 잔차에 대한 가정이 필요가 없으며, 다수의 투입 및 산출변수를 단위와 무관하게 사용할 수 있어 다양한 분야에서 강력한 성과평가 도구로써 활용되고 있다.

그러나 전통적인 자료포락분석은 내부 프로세스인 블랙박스 효율성(Black-box efficiency)을 고려하지 못하는 한계가 있으며(Wang et al, 1997), 이를 극복하기 위해 제시된 독립적 2 단계 자료포락분석 모형 역시 두 단계 간의 상충 문제로 분석 결과가 왜곡될 가능성이 있다는 한계가 있다(Chen and Zhu, 2004). 이에 본 연구에서는 독립적 2단계 모형의 한계를 극복하기 위해 내부의 과정을 중간생산물(Intermediate Factor)을 이용하여 유기적으로 연결하는 Tone and Tsutsui (2009)의 네트워크 자료포락분석 모형을 활용하여 각 수도시스템의 효율성을 분석하였다.

또한 본 연구에서 사용한 네트워크 자료포락분석 모형은 산출지향 모형으로, 효율성 분석 결과 단일의 전체 효율성 값만이 도출되기 때문에 각 단계의 효율성을 독립적으로 분석할 필요가 있다. 이때 본 연구는 SBM 자료포락분석 모형을 이용한 Dong et al. (2018)과 Zhou et al. (2018)과는 달리, 비소망 산출물을 이용하지 않기 때문에 부트스트랩 자료포락분석을 사용하여 각 단계의 효율성을 분석하였다.

부트스트랩 자료포락분석은 효율성 값에 편의를 수반하고 신뢰구간 설정이 불가능한 전통적인 DEA의 한계를 극복하기 위해 자료포락분석에 부트스트랩 기법을 적용시킨 것으로, 본 연구에서는 Simar and Wilson (1998)의 다섯 절차에 따라 부트스트랩 자료포락분석을 수행하였고, Simar and Wilson (2000)에 따라 해당 절차를 2,000회 반복수행 하였으며, Kneip et al. (2008)에 따라 신뢰구간을 추정하였다.

3.2 데이터 수집, 투입 및 산출변수 선정

본 연구에서는 2018년 기준 상수도통계, 하수도통계, 산업폐수발생 및 처리현황, 경제활동인구조사, 지역통합재정통계, 지역소득을 활용하여 국내 17개 지역의 수도시스템 효율성 분석을 위한 데이터를 수집하였다. 또한 본 연구는 문헌연구를 참조하여 국내 수도시스템의 실제에 보다 부합하도록 각 변수 및 시스템의 특성을 고려하여 투입 및 산출변수를 선정하였다. 이에 본 연구의 국내 수도시스템 프로세스에 따른 투입 및 산출변수는 다음과 같다.

먼저 상수도시스템을 살펴보면, 수도물 생산은 취수장에서 취수펌프를 이용하여 원수를 끌어들

이는 것으로 시작되며, 끌어들여진 용수는 정수 절차를 걸친 후 송수관 및 배수관을 통해 각 지역으로 공급된다. 이후 최종적으로 각 지역에 공급된 물은 지역의 지방예산과 함께 지역 경제활동인구의 경제활동 자원으로 투입되어 지역내총생산을 창출한다.

이에 따라 상수도시스템의 투입변수로 연간전기사용량(x_1 , kWh), 유지관리비(x_2 , 천원), 경제활동인구(x_3 , 명), 지방예산(x_4 , 백만원)을 선정하였으며, 산출변수로 총급수량(z_1 , m^3), 지역총생산(y_1 , 10억원)을 선정하였다. 해당 변수들의 기술통계량은 <표 4>와 같다.

<표 4> 상수도시스템 효율성 연구

	x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	y_1
Max	510,359,785	1,100,701,371	7,058	22,807,183	1,553,772,884	446,863,723
Median	70,407,596	161,759,595	988	2,392,217	256,768,194	72,950,734
Min	0	18,982,373	152	670,652	27,711,958	10,398,756
Mean	119,057,597	217,231,688	1,641	4,959,898	379,605,577	106,550,505
St.dev	135,592,355	242,923,204	1,747	6,249,244	375,218,870	119,902,225

다음으로 하수도시스템을 살펴보면, 발생된 폐수 및 하수와 배출기준을 만족하는 2~5종 폐수배출업들의 산업폐수는 하수처리장에서 여러 단계로 처리되며, 최종적으로 여과 및 소독시설을 통해 공공수역으로 방류된다. 또한 하수처리장에서의 처리수는 하수종말처리시설에서 재처리 되어 하수재이용시설이 설치된 처리시설 내에서 재이용수로써 활용되기도 하며, 공업용수, 하천유지용수, 농업용수로 사용되거나, 화장실 세정용수로 활용된다.

이에 따라 하수도시스템의 투입변수로 폐수 및 하수 발생량(x_5 , m^3 /일), 하수도 사업비용(x_6 , 백만원), 하수재이용시설 설치 시설 수(x_7 , 개)를 선정하였으며, 산출변수로 하수처리량(z_2 , m^3 /일) 및 산업폐수연계처리량(z_3 , m^3 /일), 하수재이용수 이용량(y_2 , 천톤/년)을 선정하였다. 투입 및 산출변수들의 기술통계량은 <표 5>와 같다.

<표 5> 하수도시스템 효율성 연구

	x_5	x_6	x_7	z_2	z_3	y_2
Max	4,751,917	9,590,822	34	4,747,980	121,834	293,922
Median	925,405	1,839,142	3	662,276	5,150	43,163
Min	107,794	292,549	0	63,947	65	769
Mean	1,133,257	2,653,339	6	1,139,366	15,789	65,454
St.dev	1,072,592	2,668,385	8	1,267,466	29,389	70,090

마지막으로 중수도시스템을 살펴보면, 공공수역으로 배출된 방류수는 중수도처리시설에서의 재처리과정을 통해 앞서 언급한 것과 같이 공업용수, 하천유지용수, 농업용수, 중수도 등으로 사용되거나 농축수로 만들어져 재방류된다. 방류수 처리에 따른 중수 생산은 하수도시스템에서의 하수재이용수로 이해될 수도 있으나, 방류에 따른 재처리 과정 차이와 연구모형의 지향성을 고려하여 본 연구에서는 이를 중수도시스템으로 분류하였다. 이외에도 중수도를 대표하는 수자원인 빗물 재이용은 강우 시 빗물을 빗물관리시설에 저장한 후 지반 침하, 지하수 함양, 침수피해 저감 등의 목적으로 지하 침투시키거나, 청소용수 조경용수 등의 재이용수로 활용하는 것이다.

이에 따라 중수도시스템의 투입변수로 폐수방류량(x_8 , $m^3/일$), 중수도 및 빗물 운영비용(x_9) 및 빗물 이용시설 설치비용(x_{10} , 백만원), 중수도 및 빗물 재이용시설 설치 시설 수(x_{11} , 개)를 선정하였으며, 산출변수로 중수도처리용량(z_3 , $m^3/일$) 및 저류조용량(z_4 , m^3), 중수 및 빗물 이용량(y_3 , $m^3/일$)을 선정하였다. 해당 변수들의 기술통계량은 <표 6>과 같다.

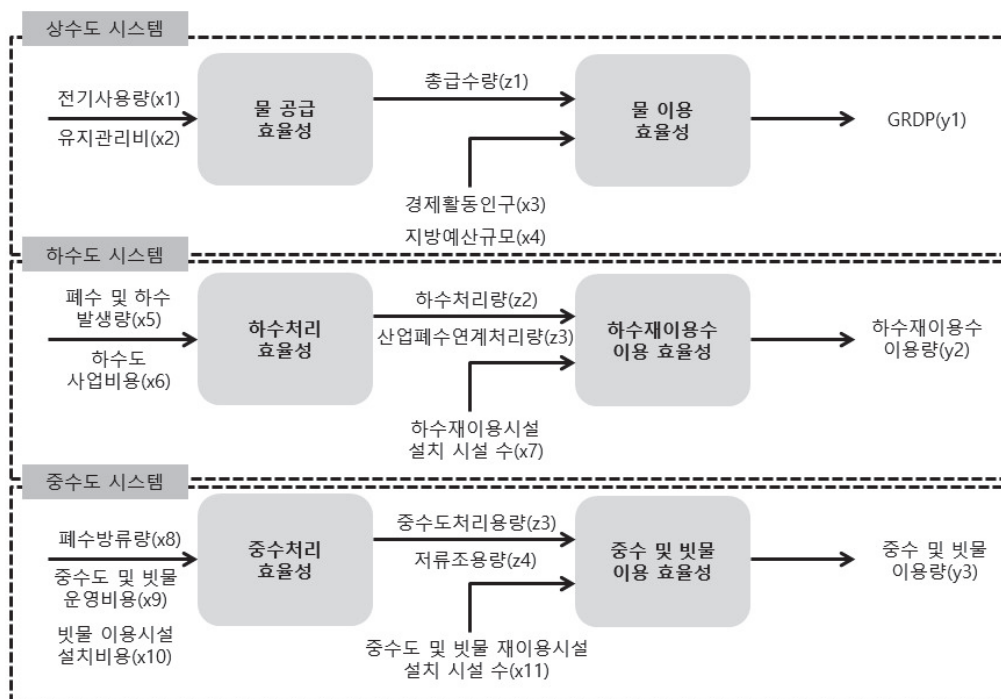
<표 6> 중수도시스템 효율성 연구

	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	z_3	z_4	y_3
Max	1,045,840	101,027	64,150	193	477,878	4,005,245	352,853
Median	193,890	1,414	7,570	30	34,401	15,965	11,323
Min	16,119	2	1,240	8	0	5,381	67
Mean	289,492	9,028	14,081	44	106,421	282,036	59,203
St.dev	263,200	23,579	15,741	42	148,772	932,510	91,567

3.3 연구모형

국내 수도시스템의 프로세스에 따른 본 연구의 효율성 평가 모형은 <그림 1>과 같다. 해당 모형은 각 수도시스템의 2단계 네트워크 DEA 모형으로, 1단계의 산출변수들이 중간변수로서 2단계의 투입변수로 사용되어 두 단계가 유기적으로 연결된다. 이에 1단계와 2단계를 포괄하는 각 수도시스템의 전체 효율성은 2단계 네트워크 DEA로 측정하며, 각 단계별 효율성은 부트스트랩 자료 포락분석을 사용하여 측정한다.

해당 모형에 따라 측정될 수도시스템의 효율성은 모두 9개이며 각 수도시스템의 효율성은 다음과 같다. 먼저 상수도시스템에는 1단계 물 공급 효율성, 2단계 물 이용 효율성과 전체 효율성인 상수도시스템 효율성이 있다. 다음으로 하수도시스템에는 1단계 하수처리 효율성, 2단계 하수재이용수 이용 효율성, 전체 효율성인 하수도시스템 효율성이 있으며, 마지막으로 중수도시스템에는 중수처리 효율성, 중수 및 빗물 이용 효율성, 전체 효율성인 중수도시스템 효율성이 있다.



<그림 1>

IV. 분석결과

수도시스템의 효율성 평가 모형에 따른 자료포락분석 결과는 <표 7>과 같다.

먼저 상수도시스템 효율성이 1인 지역은 물의 공급부터 물을 활용한 생산활동까지의 전반적인 상수도시스템이 가장 효율적으로 운영되고 있는 지역으로, 서울, 울산, 세종, 경기, 충북, 충남, 전북, 경북, 제주 등 9개 지역이다. 또한 물 공급 효율성이 1인 지역은 타지역들에 비하여 사용중인 전기 및 유지관리비를 통해 가장 많은 수준의 물을 공급하고 있는 지역으로, 서울, 광주, 대전, 세종, 경기, 충남, 제주 등 7개 지역이다. 그리고 물 이용 효율성이 1인 지역은 타지역 보다 주어진 물을 효율적으로 활용하여 최적 규모의 생산활동을 하는 지역으로 서울, 울산, 세종, 경기, 충남 등 5개 지역이다.

다음으로 하수도시스템 효율성이 1인 지역은 하수처리부터 하수 재이용수 이용까지 하수도시스템 전반이 가장 효율적으로 운영되는 지역으로, 서울, 부산, 대구, 광주, 울산, 세종, 경기, 경북 등 8개 지역이다. 그리고 하수처리 효율성이 1인 지역은 타지역 대비 지역의 폐수 및 하수를 주어진 사

〈표 7〉 수도시스템 효율성

	상수도 시스템	물공급	물이용	하수도 시스템	하수 처리	재이용수 이용	중수도 시스템	중수 처리	중수 이용
서울	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.090	0.766	0.087
부산	0.637	0.727	0.630	1.000	0.833	0.951	0.054	0.056	0.053
대구	0.536	0.749	0.510	1.000	0.903	1.000	0.039	0.178	0.039
인천	0.687	0.966	0.665	0.836	0.476	0.829	0.023	0.075	0.023
광주	0.711	1.000	0.563	1.000	1.000	0.432	1.000	1.000	1.000
대전	0.954	1.000	0.624	0.193	1.000	0.191	1.000	0.132	1.000
울산	1.000	0.614	1.000	1.000	1.000	0.623	1.000	1.000	1.000
세종	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
경기	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.546
강원	0.840	0.571	0.587	0.352	0.575	0.352	1.000	1.000	1.000
충북	1.000	0.777	0.808	0.900	0.334	0.877	0.095	0.074	0.094
충남	1.000	1.000	1.000	0.779	0.319	0.779	1.000	1.000	1.000
전북	1.000	0.880	0.645	0.647	0.709	0.565	0.015	0.754	0.014
전남	0.965	0.678	0.872	0.398	0.373	0.394	0.661	1.000	0.530
경북	1.000	0.619	0.897	1.000	0.511	1.000	0.340	1.000	0.340
경남	0.851	0.763	0.810	0.436	0.674	0.431	0.027	0.299	0.026
제주	1.000	1.000	0.449	0.082	1.000	0.082	1.000	1.000	0.201

업비를 사용하여 최적 규모로 처리하는 지역들로 서울, 광주, 대구, 울산, 세종, 경기, 제주 등 7개 지역이다. 또한 하수 재이용수 이용 효율성이 1인 지역은 하수 재처리와 재이용수 이용 시설 설치를 통한 재이용수 활용이 타지역 대비 가장 효율적인 지역들로 서울, 대구, 세종, 경기, 경북 등 5개 지역이다.

마지막으로 중수도시스템 효율성이 1인 지역은 중수도처리부터 중수도 이용까지 중수도시스템 전반이 가장 효율적으로 운영되는 지역으로, 광주, 대전, 울산, 세종, 경기, 강원, 충남, 제주 등 8개 지역이다. 또한 중수도 처리 효율성이 1인 지역은 타지역 보다 주어진 비용을 활용하여 하수처리수 및 빗물을 최대 수준으로 재처리하는 지역으로 광주, 울산, 세종, 경기, 강원, 충남, 전남, 경북, 제주 등 9개 지역이다. 그리고 중수도 이용 효율성이 1인 지역은 타지역 대비 중수도 활용이 가장 효율적인 지역으로 광주, 대전, 울산, 세종, 강원, 충남 등 6개 지역이다.

V. 결 론

본 연구는 자료포락분석을 이용하여 국내 지역들의 상수도, 하수도, 중수도시스템의 9개 효율성을 분석함으로써 각 지역의 수도시스템의 운영과 수돗물 및 재이용수 이용 실태를 파악하였다. 이에 따른 본 연구의 시사점은 다음과 같다.

먼저 본 연구는 비교적 간단한 효율성 분석 모형을 통해 지역의 수도시스템 효율성을 측정함으로써 정책 실무자가 수도시스템의 개선이 필요한 지역을 식별하는데 활용할 수 있으며, 특히 수도시스템에서 비효율을 야기하는 특정 기능을 식별 가능하다는 점에서 실무적 시사점이 있다. 또한 본 연구는 향후 물 절약 및 관리를 고려한 물 정책 및 도시계획 수립에 기초자료를 제공할 수 있다는 정책적 시사점이 있으며, 재이용수를 고려한 연구가 전무한 국내 수도시스템 효율성 연구에 이바지하였다는 학문적 시사점이 있다.

하지만 이러한 시사점에도 불구하고 본 연구는 다음과 같은 한계점이 있다. 먼저 본 연구는 일련의 프로세스로 이루어지는 수도시스템을 각각의 시스템으로 구분하여 효율성을 분석하였다. 이에 향후 연구에는 동적 또는 순환 자료포락분석 모형을 활용하여 효율성을 분석할 필요가 있다. 다음으로 본 연구는 시/도 단위의 데이터 활용에 따른 불충분한 의사결정단위 수로 충분한 수의 투입 및 산출물을 고려하지 못했다. 이에 향후 연구에서는 군/구 단위의 세부적인 데이터를 활용하여 보다 구체적인 수도시스템의 효율성을 분석하여 보다 실질적인 정보를 제공할 필요가 있다. 마지막으로 본 연구는 단기 분석만을 수행하여 시간 흐름에 따른 수도시스템의 효율성 변화를 확인하지 못했다. 이에 향후 연구에서는 시계열 데이터 활용에 따른 효율성 추이를 분석할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 고광홍, 이동규, 이도희. (2008). 상수도사업의 효율적 운영관리 방안을 위한 DEA 성과분석. 회계와정책연구, 13(1), 123-150.
2. 김나운, 이만형, 김선덕. (2015). 자료포락분석을 이용한 상수도사업 효율성 분석. 도시행정학보(한국도시행정학회 논문집), 28(4), 269-288.
3. 신유호, 최정우. (2015). 지방하수도 공기업 효율성의 결정요인 연구. 한국지방재정논집, 20(1), 57-82.
4. 윤성일. (2016). 지방하수도공기업 효율성이 부채에 미치는 영향에 관한 연구. 한국지방공기업학회보, 12, 1-24.

5. 현승현, 김정렬. (2018). DEA 모형을 통한 지방상수도 운영효율성 비교분석: 기초자치단체 중심으로. 한국행정논집, 30(1), 165-193.
6. 현승현. (2019). 지방 공공하수처리시설의 운영효율성 비교 분석. 한국지방공기업학회보, 15, 71-88.
7. An, M., He, W., Degefu, D. M., Liao, Z., Zhang, Z., and Yuan, L. (2018). Spatial Patterns of Urban Wastewater Discharge and Treatment Plants Efficiency in China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15 (9), 1892.
8. Chen, Y., and Zhu, J. (2004). Measuring information technology's indirect impact on firm performance. Information Technology and Management, 5(1), 9-22.
9. Deng, G., Li, L., and Song, Y. (2016). Provincial water use efficiency measurement and factor analysis in China: Based on SBM-DEA model. Ecological Indicators, 69, 12-18.
10. Dong, X., Du, X., Li, K., Zeng, S., and Bledsoe, B. P. (2018). Benchmarking sustainability of urban water infrastructure systems in China. Journal of Cleaner Production, 170, 330-338.
11. Fáre, R., and Grosskopf, S. (2000). Network dea. Socio-economic Planning Sciences, 34(1), 35-49
12. Feng, Y., Feng, J. K., Lee, J. H., Lu, C. C., and Chiu, Y. H. (2020). Undesirable Output in Efficiency: Evidence from Wastewater Treatment Plants in China. Applied Ecology and Environmental Research, 17(4), 9279-9290.
13. Hu, Z., Yan, S., Yao, L., and Moudi, M. (2018). Efficiency evaluation with feedback for regional water use and wastewater treatment. Journal of Hydrology, 562, 703-711.
14. Jiang, H., Hua, M., Zhang, J., Cheng, P., Ye, Z., Huang, M., and Jin, Q. (2020). Sustainability efficiency assessment of wastewater treatment plants in China: a data envelopment analysis based on cluster benchmarking. Journal of Cleaner Production, 244, 118729.
15. Kneip, A., Simar, L., and Wilson, P. W. (2008). Asymptotics and consistent

- bootstraps for DEA estimators in nonparametric frontier models. *Econometric Theory*, 24(06), 1663-1697.
16. Lombardi, G. V., Stefani, G., Paci, A., Becagli, C., Miliacca, M., Gastaldi, M., ... and Almeida, C. M. V. B. (2019). The sustainability of the Italian water sector: An empirical analysis by DEA. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1035-1043.
 17. Recycling, C. R. P. B. (2017). The Energy Saving Strategy on the Sustainable Campus Renovation Plan by Recycling and Reuse of Rainwater in Taiwan. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(2), 111-122.
 18. Seiford, L. M., and Zhu, J. (1999). Profitability and marketability of the top 55 US commercial banks. *Management Science*, 45(9), 1270-1288.
 19. Simar, L., and Wilson, P. W. (1998). Sensitivity analysis of efficiency scores: How to bootstrap in nonparametric frontier models. *Management Science*, 44 (1), 49-61.
 20. Simar, L., and Wilson, P. W. (2000). A general methodology for bootstrapping in non-parametric frontier models. *Journal of Applied Statistics*, 27(6), 779-802.
 21. Tone, K., and Tsutsui, M. (2009). Network DEA: A slacks-based measure approach. *European Journal of Operational Research*, 197(1), 243-252.
 22. Walker, N. L., Norton, A., Harris, I., Williams, A. P., and Styles, D. (2019). Economic and environmental efficiency of UK and Ireland water companies: influence of exogenous factors and rurality. *Journal of Environmental Management*, 241, 363-373.
 23. Wang, C. H., Gopal, R. D., and Zions, S. (1997). Use of data envelopment analysis in assessing information technology impact on firm performance. *Annals of Operations Research*, 73, 191-213.
 24. Wu, H., Lv, K., Liang, L., and Hu, H. (2017). Measuring performance of sustainable manufacturing with recyclable wastes: A case from China's iron and steel industry. *Omega*, 66, 38-47.
 25. Wu, J., Zhu, Q., Chu, J., and Liang, L. (2015). Two-stage network structures with undesirable intermediate outputs reused: A DEA based approach. *Computational Economics*, 46(3), 455-477.

26. Yang, F., Du, F., Liang, L., and Yang, Z. (2014). Forecasting the production abilities of recycling systems: A DEA based research. *Journal of Applied Mathematics*, 2014.
27. Yang, W., and Li, L. (2017). Analysis of total factor efficiency of water resource and energy in China: A study based on DEA-SBM model. *Sustainability*, 9(8), 1316.
28. Yao, X., Feng, W., Zhang, X., Wang, W., Zhang, C., and You, S. (2018). Measurement and decomposition of industrial green total factor water efficiency in China. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1144-1156.
29. Zhou, X., Luo, R., Yao, L., Cao, S., Wang, S., and Lev, B. (2018). Assessing integrated water use and wastewater treatment systems in China: A mixed network structure two-stage SBM DEA model. *Journal of Cleaner Production*, 185, 533-546.